第 37 卷第 12 期 2017 年 6 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.12 Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201606151160
夏琳琳,张妍,李名镜.城市碳代谢过程研究进展.生态学报,2017,37(12):4268-4277.
Xia L L, Zhang Y, Li M J.A review of urban carbon metabolism.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4268-4277.

城市碳代谢过程研究进展

夏琳琳[1,2],张 妍[1,*],李名镜[1]
1 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875
2 暨南大学环境学院,广州市环境暴露与健康重点实验室,广东省环境污染与健康重点实验室,广州 510632

摘要:碳代谢过程分析是城市代谢研究的重要环节,而通过土地利用/覆盖的空间调整优化城市碳代谢过程已成为区域可持续发展的关键。利用城市代谢思想,本文综述了城市碳代谢过程核算、碳代谢网络模拟、碳代谢过程与土地利用/覆盖变化关系分析、碳代谢空间格局演替等方面的内容,并指出了当前研究中存在着空间属性表达缺乏、核算/模拟结果较难直接应用于实践调控、自然和社会经济代谢过程难以并重考虑等问题。在此基础上,提出了此领域未来发展预期:(1)基于土地流转,将碳排放/碳吸收垂向流映射到碳存量变化的水平流,以"存量"变化推导出网络"流量"分布,实现节点、流互动关系的空间表达,构建时空维度碳代谢网络模型;(2)强调自然节点在城市碳代谢网络中的重要作用,形成社会经济节点与自然节点并重的生态网络模型,有效服务于城市规划及设计。

关键词:城市碳代谢;生态网络;土地利用/覆盖变化;空间分析

A review of urban carbon metabolism

XIA Linlin[1,2], ZHANG Yan[1,*], LI Mingjing[1]
1 *State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control*, *School of Environment*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
2 *School of Environment*, *Guangzhou Key Laboratory of Environmental Exposure and Health*, *and Guangdong Key Laboratory of Environmental Pollution and Health*, *Jinan University*, *Guangzhou* 510632, *China*

Abstract: Carbon metabolism is the key process of the urban metabolic system. The optimization of carbon metabolism through land use/cover change and spatial adjustment has been the focus of sustainable development in urban areas. Under the framework of urban metabolism, this paper includes a comprehensive review of carbon metabolic process accounting, ecological network analysis of urban carbon metabolism, the relationship between carbon metabolism and land use/cover change, and the spatial patterns of carbon metabolism. This paper summarizes the insufficiencies of current research, including insufficient spatial analysis of the network of carbon metabolism, limitations to practical application of carbon budget and modeling results, and the disparity between natural and social-economic activities in the same system. Finally, future needs in research are proposed: 1) A spatially explicit network model of urban carbon metabolism should be built within the perspective of land use/cover change. The model should investigate network flows, using carbon emission and sequestration accounting results, which could represented the carbon storage of the biosphere. Then, the flows between any two nodes of the network could be deduced by accounting for changes in storage. The spatial expression of the interaction between any two nodes could be explored using the model. 2) The model should also focus on natural activities in the urban

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503005);新世纪优秀人才支持计划"生态模拟"(NCET-12-0059);国家自然科学基金创新研究群体项目"流域水环境、水生态和综合管理"(51421065);国家自然科学基金面上项目 "京津冀城市群能源-污染物代谢过程-格局-机理研究"(41571521);中央高校基本科研业务费专项资金"城市能量代谢过程及其碳足迹分析"(2015KJJCA09);中美国际(地区)合作交流项目(51661125010)

收稿日期:2016-06-15; **修订日期**:2017-02-21

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangyanyxy@126.com

metabolic system. The network model should include both natural and socio-economic nodes and should be constructed to support urban planning.

Key Words: urban carbon metabolism; ecological network; land use and cover change; spatial analysis

类比生物体新陈代谢过程,城市代谢是指城市吞吐、消纳物质和能量的过程,其研究为理解城市可持续发展提供了有效的工具与手段。自 1965 年 Wolman 首次明确了城市代谢的概念,并开展了假想的百万人口城市代谢分析之后[1],一些学者应用城市代谢的思想,开展了单一物质流或元素的代谢过程研究。同时,随着全球气候变化愈加重要,面对着碳排放量的居高不下,碳作为城市代谢过程的关键要素不断受到人们的关注[2-3]。城市碳代谢过程的研究十分复杂,早期开展的流量核算是研究基础,而从"网络"视角模拟与分析碳代谢过程,为进一步探求其内在作用机理及运行规律提供了技术方法支撑。在此基础上,开展的土地利用/覆盖变化与碳代谢过程的关联研究,可将碳代谢的研究结果落实到土地上,并赋予其空间属性,为低碳城市的规划与设计、碳减排提供科学支持。本文将从 4 个方面对碳代谢过程的研究情况进行梳理,即碳代谢过程核算、碳代谢网络分析与模拟、碳代谢过程与土地利用/覆盖变化的响应关系分析,以及碳代谢过程空间格局研究,这 4 个方面的研究进展充分体现了城市碳代谢过程整合社会经济和自然组分、融合时间与空间维度的双重属性特征。

1　碳代谢过程核算

碳代谢过程核算以城市代谢为基本框架,追踪碳在整个城市生态系统中的流动过程,其研究可以很好地理解城市碳元素的流转过程及其环境影响[4]。早期的碳核算研究可以追溯至 1969 年,研究者将工业、居民消费、交通等活动产生的碳排放纳入到美国物质流核算框架体系中,同时还考虑了林业和水域的碳汇[5]。此后,一系列碳流核算框架不断发展,使得追踪城市碳流动的研究更加有据可循。1993 年 ICLEI[6] 发起了城市碳减排计划,重点核算了能源消耗产生的碳排放,开启了城市尺度碳核算的先河;1998 年 WRI/WBCSD[7] 从理论上提出了城市外部电力、热力输入以及跨界交通、废弃物处置等活动产生的间接碳排放的核算思路与方法;2006 年 IPCC[8] 也建立了燃料缺省碳排放因子体系,为城市碳核算研究提供了可参考的经验系数。

基于这些研究框架,一些学者针对不同城市、不同社会经济活动开展了碳核算研究,如 Los Angeles County、Greater Prague 等 10 个城市资源能源消耗、交通电力增加、建成区设计等活动的碳排放[9],Barcelona 港口城市交通运输活动的碳排放[10],以及厦门市居民住宅区能源消耗的碳排放[11]。还有一些研究在考虑社会经济活动碳排放过程的基础上,分析了从大气圈到生物圈的自然碳吸收过程,如 Baccini[12] 除考虑 Swiss Lowland 食品加工、工业贸易、能源转化、居民消耗和废物管理等社会经济活动的碳排放外,还考虑了农业活动的碳排放,并关注农田和森林的碳吸收过程;Kellett 等[13] 在核算温哥华建筑和机动车能源消费碳排放的同时,考虑了植被的碳储量;Zhang 等[14] 全过程核算了北京自然活动产生的生物代谢流和社会经济活动产生的技术代谢流。同时,还有学者解析核算了社会经济系统内部商品、服务传递过程中隐含的碳元素流动,但这些研究仅将自然视为一个组分,没有深入剖析自然环境内部的碳代谢过程[15-16]。

从以上研究不难看出,目前城市碳代谢核算研究大多关注局部过程,或集中于碳排放、碳吸收的重要代谢路径,或集中于社会经济过程弱化自然过程。对于一个完整的城市碳代谢过程而言,不仅应当包括社会经济组分的碳排放,还应包括自然组分的碳排放与碳吸收,以及社会经济、自然组分内部的碳流转,如图 1 所示。只有利用城市代谢方法追踪生态系统的碳流动的全过程,才能有效服务于城市低碳规划及设计。

2　碳代谢网络分析与模拟

当前,以"网络"视角来分析与模拟碳代谢过程逐渐成为研究主流。城市碳代谢过程涉及到多类型代谢

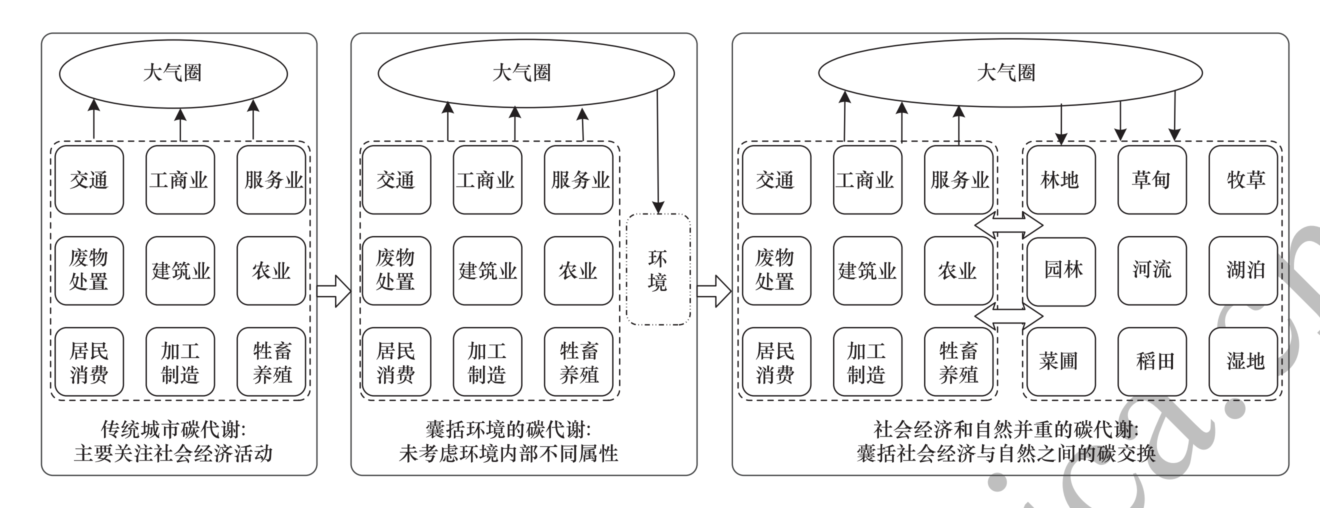


图 1 城市碳代谢过程核算的发展[9,16-17]

Fig.1 The accounting development of urban carbon metabolism

主体、多种传递路径,各主体及路径之间相互影响又形成了复杂的作用关系,这为构建碳代谢网络模型提供了可能。在采用生态网络方法分析、模拟碳代谢过程中,形成了一系列指标来表征主体、路径、网络整体的生态特征,例如通量、协同指数和营养级等[16-18],为定量剖析系统结构与功能提供了有效方法[19-20]。自 Hannon[21]初次应用生态网络方法,分析模拟生态系统的结构分布及各营养级之间的相互作用关系以来,该方法在描述系统内部不同组分间物质和能量流动等方面已愈发成熟[19,22]。生态网络分析最早在自然生态系统中得到了广泛的应用[23-24],2009 年 Zhang 等将该方法引入到城市水代谢分析中,开启了采用生态网络方法研究社会经济代谢过程的新方式。

当前流量和效用分析在城市代谢中得到了初步应用[25]。生态网络流量分析方法可以探寻影响城市碳代谢的关键过程,如 Zhang 等[18]识别了工业、交通等 28 个社会经济部门之间的能源流动过程,构建了北京城市网络模型,并对其碳足迹进行分析,研究指出社会服务、消费和重工业等部门为关键节点,还有学者基于土地流转构建碳代谢过程的网络模型,指出交通与农业之间的转化为网络关键路径[26]。一些学者进一步采用综合流量分析,识别了间接效益对于代谢过程的影响,研究指出间接作用是削减碳足迹的关键[18]。关键节点和路径的识别可以根据不同部门的排放特征,有针对性地提出碳减排建议[27]。生态网络效用分析则可以定量模拟代谢主体之间的生态关系,并结合流量分析辨识网络的生态层阶结构[28]。通过这种方式所判定的生态层阶结构已经成为对城市生态系统的代谢障碍进行诊断的有效途径。就生态关系定量研究而言,一些学者重点分析了社会经济主体之间的关系构成,如针对香港和维也纳的碳代谢网络模型,分析了工业、交通和农业等经济部门之间的关系结构,认为环境是被社会经济主体掠夺的主要对象[15-16]。此外,共生和竞争关系也是社会经济代谢主体间存在的生态关系类型,前者是可维持代谢过程的共生水平[29],后者则可以在一定程度上提高代谢效率[25]。就碳代谢网络的生态层阶而言,城市很难形成自然生态系统中常见的金字塔结构,系列研究表明,城市层阶结构可能会出现纺锤型、橄榄型等不同的结构[18,30]。尽管如此,组织结构合理的社会经济代谢过程仍有可能形成金字塔结构,如 Lu 等[31]针对北京市社区尺度的碳代谢过程构建网络模型,考虑环境和景观对消费、能源和服务等部门的支撑作用,系统形成了较为规则的金字塔结构。由于城市代谢过程中存量相对难以估算,这限制了存量分析方法在此领域的应用,但仍有一些学者试图解释城市代谢过程的存量,主要通过输入与输出总量的差值来间接反映存量变化[23,32]。生态网络分析的具体方法如图 2 所示。

目前,碳代谢过程的生态网络分析与模拟研究中,大多关注于社会经济活动对城市碳代谢过程的影响,较少考虑自然环境或不同自然主体的属性差异,如在碳代谢网络模型构建中或将环境统归为一个节点[15],或将环境划分为外部和内部环境[16],或将环境划分为本地环境和外部景观[31],均忽略了自然环境内部组分的属性差异。但也有较少研究试图在城市碳代谢过程中区别环境内部的不同属性,如 Zhang 等[26]和 Xia 等[17]在

北京城市碳代谢网络分析与模拟研究中,初次将不同属性的自然代谢主体(林地、草地等)纳入到生态网络模型中,并指出不同自然代谢主体对流量、关系结构的贡献都存在差异,但目前对自然主体参与碳代谢过程的研究还相对粗略,同时,由于数据的高度聚合也给不同社会经济活动的空间映射研究带来一定的困难,从而导致碳代谢过程的空间分析并不充分。

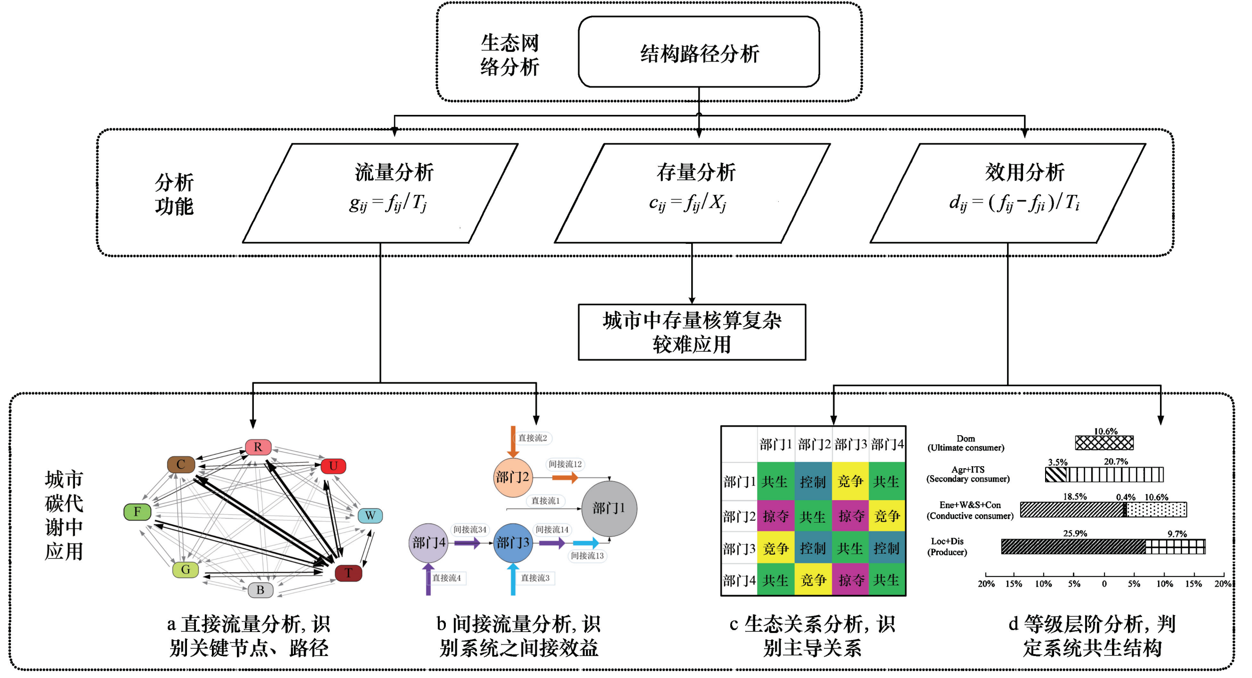


图 2　生态网络分析方法及在城市碳代谢研究中应用[18,26,31-32]

Fig.2　Application of ecological analysis in urban carbon metabolism

3　碳代谢过程与土地利用/覆盖变化响应关系

土地利用/覆盖变化对碳生物地球化学循环过程的影响已成为仅次于化石能源燃烧的第二大因素,通过土地利用/覆盖变化调整来促进区域低碳发展已成为世界各国研究的重点[33]。城市作为碳排放的重点地区,约有 1/3 碳排放来自于土地利用变化[8],因此,从土地利用/覆盖角度探讨城市碳代谢过程的研究可有效指导城市规划和设计的实践[34]。

国外学术界早在 1977 年便开始了 LUCC 与陆地生态系统碳循环的关系研究,得出土地整理是导致大气 CO_2 含量增加的重要结论[35]。各国学者开展了生物群落层次上的自然生态系统研究[36-38],如森林生态系统[39-40]和草地生态系统[41-42]等,认为"还林还草"活动可以有效增加碳吸收,而森林的"碳失汇"过程[43-44],以及草地和森林转化为农田[45]等过程也间接增加了碳排放。这些研究识别了不同自然生态系统的属性差异,为城市尺度的研究奠定了基础。随着研究技术的发展,城市尺度碳收支的核算从实地调查、资料收集估算[46-47],发展为结合经验数据的模型模拟[48-49],以及 3S 技术遥感估算[50-51]。为了实现不同的研究目的,研究者采用多手段多技术结合的方式使城市尺度的碳收支估算更加准确,如模型与遥感结合[52-53],实地调查和模型模拟结合[54-55]、实地调查和遥感结合[56-57]估算碳通量。

从土地利用/覆盖变化角度开展城市碳代谢过程研究需承接城市尺度的碳收支核算工作[12],如一些学者采用实地调查和模型结合的方式核算了碳代谢过程,并关注了土地利用/覆盖变化中碳存量增加和减少的过程[58]。城市碳代谢过程与土地利用/覆被变化的关系研究结合了城市代谢的思想,更加注重诊断"代谢障碍",治愈"代谢疾病",如街区尺度的可持续城市规划设计[59],以及针对城市扩张的土地利用/覆盖优化布局[56]等。相对于群落层次的自然生态系统研究,城市碳代谢过程与土地利用/覆盖变化响应关系的研究还需

考虑到社会经济活动对城市碳代谢过程的影响,包括人工管理活动增加植被碳吸收能力[60],人类干扰造成自然组分的减少[61]以及自然景观的破碎化[4,62]。从土地利用/覆盖变化角度探求碳代谢过程的动态变化规律的研究示意图见图3,在该理论框架下,分析自然和社会经济代谢活动与土地过程之间的胁迫与响应关系将是未来研究的重点。

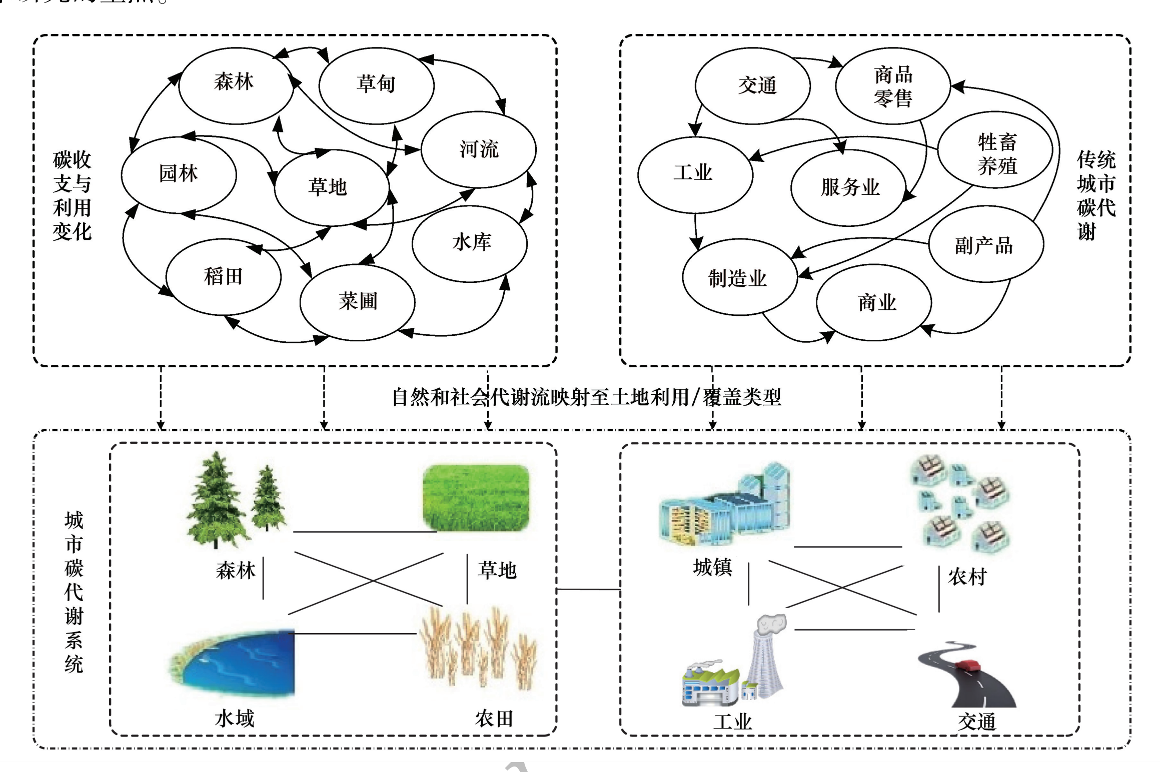


图3 城市碳代谢与土地利用/覆盖变化响应关系分析示意图[9,32]

Fig.3 The corresponds between urban cabon metabolism and land use/cover change

4 碳代谢过程的空间格局

碳代谢过程空间格局的研究现状,应用与发展见图4。随着城市结构在减缓碳排放方面的作用日益重要,研究者开始进行碳收支的空间分异研究[63-64]。城市化导致了土地利用/覆盖变化,进而形成了复杂的城市空间结构[65],并通过自然植被的破碎化影响着城市环境[66],导致了碳收支的空间差异[67]。不同城市之间,城市内不同区域之间都存在显著的碳收支分布格局差异。不同城市的碳排放贡献定量核算表明,中国和亚洲等地的城市表现为碳源,而其他区域正在或将由碳源转变为碳汇[55],而不同城市林地的碳汇核算表明碳吸收空间分布也存在差异[64],以美国城市为例,其中北部、西北部城市碳汇较大,而西北部城市碳汇则较小[68]。就城市内部而言,研究者根据自然组分的变化确定碳通量差异,将城市不同区域划分为绿地区、贫民区和建成区[69]。还有学者以城市中心为标尺分析碳排放和碳吸收的空间格局差异,即距离城市中心越近碳排放越大,碳吸收越小[70]。在以上研究基础上,有学者从代谢视角展开空间格局研究,发现碳代谢过程的空间格局呈现出相似的特性,即显著的空间梯级变化特性,如 Helsinki 的碳吸收在空间上呈现多中心梯级递减[56],北京城市碳代谢过程研究同样显示出较为显著的空间梯级变化,碳排放呈现单中心梯级递减,碳吸收则呈现多中心梯级递减[32]。

碳收支空间格局的研究通常以碳核算为基础,且基于不同核算方法,碳收支的空间表达方式也存在差异。通过遥感数据反演地表碳排放浓度[71]以及碳存量的空间分布[72]较为常见,该方法依赖于所能获得的遥感数据精度。而在核算的基础上结合 GIS 技术对确定边界内碳排放和碳吸收[73-76]进行赋值的空间表达方法可操作性较强,但对空间格局的细节特征表征不足。一些学者基于碳收支空间梯度研究,结合决策系统,识别适合

城市发展的最佳策略,如对芬兰首都 Helsinki[56]而言,区域保护主义的发展策略由于建设用地扩张较少,因此对碳代谢格局的影响最小,而对于英国首都 London 而言,区域融合式的高效发展有助于提高区域植被覆盖[57]。

目前,相关研究成果更加倾向于将碳排放/碳吸收空间分布作为环境表现的指标,评价不同城市发展策略对碳代谢空间格局的影响,不能很好地服务于政策制定。因此,未来研究应当更加注重碳代谢主体之间关系、结构的空间解析,为城市空间调控提供关键信息,支持城市生态空间优化与管理。

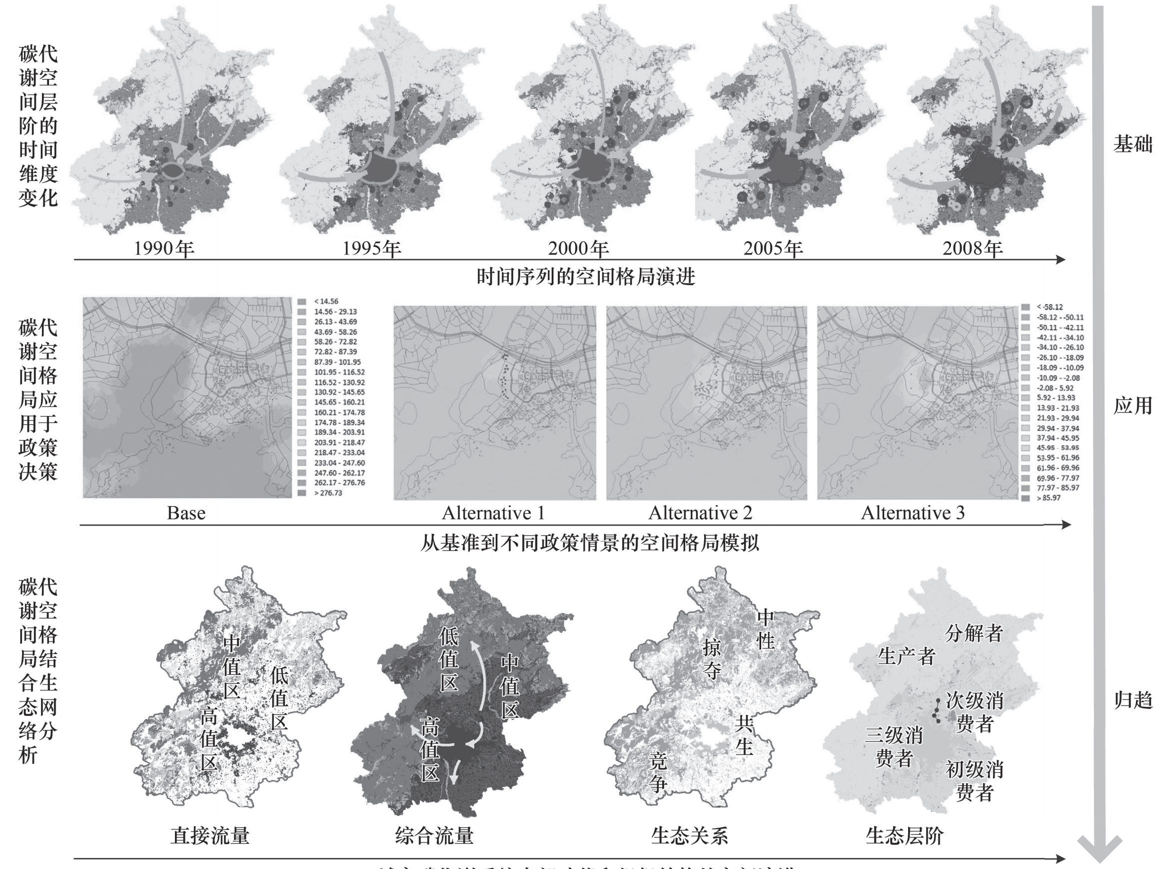


图 4　碳代谢过程空间格局研究的现状、应用与发展[32,56]

Fig.4　Spatial pattern of carbon metabolism: current status, applications and prospects

5　未来研究方向

构建和谐有效的城市生态网络已然成为实现碳减排目标、开展城市生态规划与设计的重要任务[77]。当前城市碳代谢过程研究大多通过不同部门消耗的物质能源量来指导城市设计[9],而基于网络思维所构建的城市生态网络着眼于路径中“流”的核算,但还无法实现空间的直观表达,从而不能对城市空间进行方向和幅度的调整。而景观生态网络研究虽能够在空间上判定可能路径,但无法确定真正的流量与流向,不能量化描述城市碳代谢过程[78]。两类生态网络的研究各有侧重,前者倾向描述社会经济活动,后者则描述自然活动,结合两者开发城市碳代谢过程空间网络模型将是未来研究的重点。针对当前城市碳代谢过程网络分析强调社会经济节点的现状,突出自然节点的贡献,将自然和社会经济活动等代谢主体置于网络中同等重要的位置,充分考虑社会经济活动对自然节点的影响,以及自然节点对社会经济节点的资源供给与废物接纳作用,全面实现碳代谢过程结构-功能-格局的定量模拟与调控。同时,为了赋予网络空间属性,将空间维度信息加入网络,基于土地流转,将碳排放/碳吸收等垂直流映射到碳存量变化的水平流,以“存量”变化推导出网络“流量”

分布,实现节点、流互动关系的空间表达,最终构建时空维度碳代谢网络模型。在城市尺度上构建链接人工组分和自然组分的碳代谢空间网络,通过控制关键代谢过程的空间整合优化城市空间格局[79]。

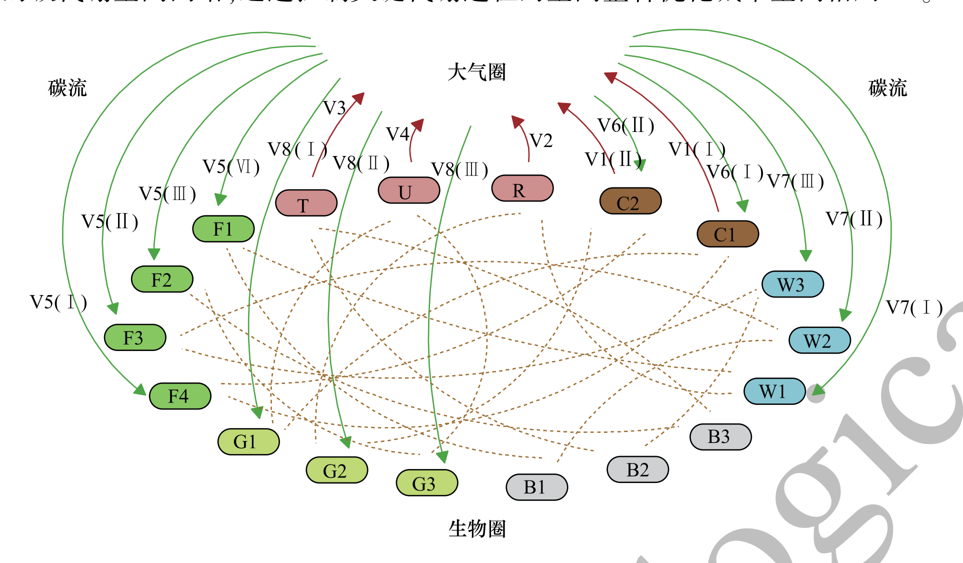


图 5 碳代谢过程的空间网络模型

Fig.5 The conceptual model of a city's spatial carbon metabolism network

F1:有林地;F2:灌木林地;F3:疏林地;F4:其他林地;G1:高覆盖草地;G2:中覆盖草地;G3:低覆盖草地;W1:河流;W2:水库;W3:湿地;U:城镇;R:农村;T 交通工矿;B1:沙地;B2:裸地;B3:裸岩石质地;C1:水田;C2:旱地 V1—V8 为大气圈与生物圈之间的碳交换过程,黄色虚线为生物圈中碳转移过程

参考文献(References):

[1] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213(3): 179-190.

[2] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: a preliminary comparative global assessment. Energy Policy, 2009, 38(9): 4856-4869.

[3] Karakiewicz J. Urban metabolism of low carbon cities//The 47th ISOCARP Congress. International Society of City and Regional Planners (ISOCARP) and Urban Planning Society of China (UPSC). Wuhan, China: UPSC, 2011.

[4] Pataki D E, Alig R J, Fung N E, Golubiewski N E, Kennedy C A, McPherson E G, Nowak D J, Pouyat R V, Lankao R. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2092-2102.

[5] Ayres R U, Kneese A V. Production, consumption and externalities. American Economic Review, 1969, 59(3): 282-297.

[6] ICLEI. Cities for Climate Protection. An International Campaign to Reduce Urban Emissions of Greenhouse Gases. Toronto: ICLEI, 1993.

[7] WRI/WBCSD. Greenhouse Gas Protocol. 1998. http://www.ghgprotocol.org/about-ghgp/about-wri-and-wbcsd.

[8] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/.

[9] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havránek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities. Energy Policy, 2010, 38(9): 4828-4837.

[10] Villalba G, Gemechu E D. Estimating GHG emissions of marine ports-the case of Barcelona. Energy Policy, 2011, 39(3): 1363-1368.

[11] Ye H, Wang K, Zhao X F, Chen F, Li X Q, Pan L Y. Relationship between construction characteristics and carbon emissions from urban household operational energy usage. Energy and Buildings, 2011, 43(1): 147-152.

[12] Baccini P. Understanding regional metabolism for a sustainable development of urban systems. Environmental Management Strategies, 1996, 3(2): 108-111.

[13] Kellett R, Christen A, Coops N C, Van Der Laan M, Crawford B, Tooke T R, Olchovski I. A systems approach to carbon cycling and emissions modeling at an urban neighborhood scale. Landscape and Urban Planning, 2013, 110: 48-58.

[14] Zhang Y, Li J, Fath B D, Zheng H M, Xia L L. Analysis of urban carbon metabolic processes and a description of sectoral characteristics: A case study of Beijing. Ecological Modelling, 2015, 316: 144-154.

[15] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: a case study of Vienna, Austria. Environmental Science Technology, 2012, 46(8): 4498-4506.

[16] Chen S Q, Chen B. Determining carbon metabolism in urban areas though network environ theory. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2246-2255.

[17] Xia L L, Fath B D, Scharler U M, Zhang Y. Spatial variation in the ecological relationships among the components of Beijing's carbon metabolic system. Science of the Total Environment, 2016, 544: 101-113.

[18] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D. Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: Model development and a case study for Beijing. Energy Policy, 2014, 73: 540-551.

[19] Patten B C. Environs: Relativistic elementary-particles for ecology. American Naturalist, 1982, 119(2): 179-219.

[20] Fath B D, Killian M C. The relevance of ecological pyramids in community assemblages. Ecological Modelling, 2007, 208(2/4): 286-294.

[21] Hannon B. The structure of ecosystems. Journal of Theoretical Biology, 1973, 41(3): 535-546.

[22] Patten B C. Network ecology: indirect determination of the life-environment relationship in ecosystems//Higashi M, Bums T, Eds. Theoretical Studies of Ecosystems: the Network Perspective. New York: Cambridge University Press, 1991.

[23] Finn J T. Flow analysis of models of the Hubbard brook ecosystem. Ecology, 1980, 61(3): 562-571.

[24] Baird D, Fath B D, Ulanowicz R E, Asmus H, Asmus R. On the consequences of aggregation and balancing of networks on system properties derived from ecological network analysis. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3465-3471.

[25] Li S S, Zhang Y, Yang Z F, Liu H, Zhang J Y. Ecological relationship analysis of the urban metabolic system of Beijing, China. Environmental Pollution, 2012, 170: 169-176.

[26] Zhang Y, Xia L L, Fath B D, Yang Z F, Yin X A, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case study of Beijing, China. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 4306-4317.

[27] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li J J, Yin X A, Liu G Y, Su M R. Analysis of urban energy consumption in carbon metabolic processes and its structural attributes: a case study for Beijing. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 884-897.

[28] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: Model development, and a case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2010, 408(20): 4702-4711.

[29] Zhang Y, Liu H, Li Y T, Yang Z F, Li S S, Yang N J. Ecological network analysis of China's societal metabolism. Journal of Environmental Management, 2012, 93(1): 254-263.

[30] Lu Y, Su M R, Liu G Y, Chen B, Zhou S Y, Jiang M M. Ecological network analysis for a low-carbon and high-tech industrial park. Scientific World Journal, 2012, 2012: 305474.

[31] Lu Y, Chen B, Hayat T, Alsaedi A. Communal carbon metabolism: methodology and case study. Journal of Cleaner Production, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.137.

[32] Zhang Y, Xia L L, Xiang W N. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism: A case study in Beijing, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 130: 184-200.

[33] Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan S F, Liu J Y, McGuire A D, Moore B. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. Global and Planetary Change, 2003, 37(3/4): 201-217.

[34] Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 1965-1973.

[35] Bolin B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle. Science, 1977, 196(4290): 613-615.

[36] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. Tellus B, 2003, 55(2): 378-390.

[37] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 潘嫄, 王梦麦. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(2): 197-210.

[38] Canadell J G, Raupach M R, Houghton R A. Anthropogenic CO_2 emissions in Africa. Biogeosciences, 2009, 6(3): 463-468.

[39] Houghton R A, Lefkowitz D S, Skole D L. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 I. Progressive loss of forests. Forest Ecology and Management, 1991, 38(3/4): 143-172.

[40] Espírito-Santo F D, Gloor M, Keller M, Malhi Y, Saatchi S, Nelson B et al. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. Nature Communications, 2015, 5(3):487-507.

[41] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. Global Change Biology, 2002, 8(8): 736-753.

[42] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.

[43] Kauppi P E, Mielikäinen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. Science, 1992, 256(5053): 70-74.

[44] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[45] Houghton R A, Goodale C L. Effects of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems// DeFries R S, Asner G P, Houghton R A, eds. Ecosystems and Land Use Change. Washington: American Geophysical Union, 2004.

[46] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.

[47] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.

[48] Schulp C J E, Nabuurs G J, Verburg P H. Future carbon sequestration in Europe-effects of land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 127(3/4): 251-264.

[49] Rittenhouse C D, Rissman A R. Forest cover, carbon sequestration, and wildlife habitat: policy review and modeling of tradeoffs among land use change scenarios. Environmental Science & Policy, 2012, 21(4): 94-105.

[50] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, Zhuang D F, Zhang S W, Hu W Y. Characterization of changes in land cover and carbon storage in Northeastern China: an analysis based on Landsat TM data. Science in China: Series C-Life Sciences, 2002, 45(S1): 40-47.

[51] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Zhu B, Tan K, Tao S. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): GB2027.

[52] Zhao T T, Brown D G, Bergen K M. Increasing gross primary production (GPP) in the urbanizing landscapes of southeastern Michigan. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(10): 1159-1167.

[53] Liu J X, Vogelmann J E, Zhu Z L, Key C H, Sleeter B M, Price D T, Chen J M, Cochrane M A, Eidenshink J C, Howard S M, Bliss N B, Jiang H. Estimating california ecosystem carbon change using process model and land cover disturbance data: 1951-2000. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2333-2341.

[54] Christen A, Coops N C, Crawford B R, Kellett R, Liss K N, Olchovski I, Tooke T R, Van Der Laan M, Voogt J A. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. Atmospheric Environment, 2011, 45: 6057-6069.

[55] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution. Ecological Modelling, 2008, 216(2): 208-216.

[56] Chrysoulakis N, Lopes M, San José R, Grimmond C S B, Jones M B, Magliulo V, Klostermann J E M, Synnefa A, Mitraka Z, Castro E A, González A, Vogt R, Vesala T, Spano D, Pigeon G, Freer-Smith P, Staszewski T. Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. Landscape and Urban Planning, 2013, 112: 100-117.

[57] González A, Donnelly A, Jones M, Chrysoulakis N, Lopes M. A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. Environmental Impact Assessment Review, 2013, 38: 109-119.

[58] Christen A, Coops N, Kellett R, Crawford B, Heyman E, Olchovski I, Tooke R, Van Der Laan M. A LiDAR-Based Urban Metabolism Approach to Neighbourhood Scale Energy and Carbon Emissions Modelling. British: University of British Columbia, 2010.

[59] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havránek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. Greenhouse gas emissions from global cities. Environmental Science & Technology, 2009, 43(19): 7297-7302.

[60] Golubiewski N E. Urbanization increases grassland carbon pools: effects of landscaping in Colorado's Front Range. Ecological Applications, 2006, 16(2): 555-571.

[61] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864): 756-760.

[62] Alberti M, Marzluff J M. Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. Urban Ecosystems, 2004, 7(3): 241-265.

[63] Gonzalez G A. Urban sprawl, global warming and the limits of ecological modernisation. Environmental Politics, 2005, 14(3): 344-362.

[64] McPherson G, Simpson J R, Peper P J, Maco S E, Xiao Q F. Municipal forest benefits and costs in five US cities. Journal of Forestry, 2005: 103(8): 411-416.

[65] López E, Bocco G, Mendoza M, Duhau E, Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case in Morelia City, Mexico. Landscape and Urban Planning, 2001, 55(4): 271-285.

[66] Tang U W, Wang Z S. Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system. Environmental Modeling & Software, 2007, 22(12): 1750-1764.

[67] Ramamurthy P, Pardyjak E R. Toward understanding the behavior of carbon dioxide and surface energy fluxes in the urbanized semi-arid Salt Lake Valley, Utah, USA. Atmospheric Environment, 2011, 45(1): 73-84.

[68] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.

[69] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. Modelling carbon dynamics from urban land conversion: fundamental model of city in relation to a local

carbon cycle. Carbon Balance and Management, 2006, 1(8): 1-9.

[70] Hutyra L R, Yoon B, Hepinstall-Cymerman J, Alberti M. Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: a case study in the Seattle metropolitan region. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(1): 83-93.

[71] Wentz E A, Gober P, Balling Jr R C, Day T A. Spatial patterns and determinants of winter atmospheric carbon dioxide concentrations in an urban environment. Annals of the Association of American Geographers, 2002, 92(1): 15-28.

[72] Wu J D, Bauer M E. Estimating net primary production of turfgrass in an urban-suburban landscape with Quickbird imagery. Remote Sensing, 2012, 4(12): 849-866.

[73] 蔡博峰, 2011. 城市温室气体清单研究. 气候变化研究进展, 7(1): 23-28.

[74] Myeong S, Nowak D J, Duggin M J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 277-282.

[75] Davies Z G, Edmondson Z L, Heinemeyer A, Leake J R, Gaston K J. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5): 1125-1134.

[76] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(2): 121-128.

[77] Zhang L Q, Wang H Z. Planning an ecological network of Xiamen Island (China) using landscape metrics and network analysis. Landscape and Urban Planning, 2006, 78(4): 449-456.

[78] Jongman R H G, Külvik M, Kristiansen I. European ecological networks and greenways. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2/3): 305-319.

[79] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1): l-17.